



Elektricitet direkte fra atomenergien

Storm Pedersen, E.

Publication date:
1966

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Storm Pedersen, E. (1966). *Elektricitet direkte fra atomenergien*. Atomenergikommissionens Forsøgsanlæg Risø. Risø-M No. 399

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

JUL 15 1966

MASTER

ATOMENERGIKOMMISSIONENS

Forsøgsanlæg Risø

Konstruktionsafdelingen

Risø-M-399

10. maj 1966

ELEKTRICITET DIREKTE FRA ATOMENERGIEN

af

Erik Storm Pedersen

RELEASED FOR ANNOUNCEMENT
IN NUCLEAR SCIENCE ABSTRACTS

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

Title and author(s)

Elektricitet direkte fra atomenergien

(Electricity directly from atomic energy)

by

Erik Storm Pedersen

Date

Maj, 1966

Department or group

Engineering Dept.

Group's own registration

number(s)

35 pages + tables + illustrations

Abstract

The report describes how electricity now can be produced directly from atomic energy without the use of pumps, turbines etc. This is possible by using magnetohydrodynamic (MHD), thermoelectricity and thermionic in connection with a nuclear reactor or radioisotopes as heat sources.

The report also explains the main principles of these three direct conversion methods and some of the problems, they must overcome, before they become important as power sources. Some of the present and future systems are described.

Copies to

Abstract to

ATOMENERGIKOMMISSIONENS

Forsøgsanlæg Risø
Konstruktionsafdelingen

Risø-M-399

10. maj 1963

ELEKTRICITET DIREKTE FRA ATOMENERGIEN

af

Erik Storm Pedersen

RELEASED FOR ANNOUNCEMENT
IN NUCLEAR SCIENCE ABSTRACTS

Resumé

Elektricitet kan nu fremstilles direkte fra atomenergien uden brug af bevægelige dele, såsom pumper, turbiner og andet. Dette kan opnås ved brugen af magnetohydrodynamiske (MHD), termoelektriske eller termioniske principper i forbindelse med en nuklear reaktor eller isotoper som varmekilde.

Rapporten forklarer grundprincipperne i disse tre metoder og nogle af de problemer som må overvindes, førend de får stor betydning som kraftkilder. Der er desuden omtalt nogle af de hidtil fremstillede og planlagte systemer og deres anvendelse i rumfarten, på landjorden og på søen.

<u>Indholdsfortegnelse</u>	<u>Side</u>
1.0. Indledning	2
2.0. Magnetohydrodynamiske system (MHD)	3
2.1. Indledning	3
2.2. Materialer til MHD-systemet	5
3.0. Termoelktricitet	8
3.1. Indledning	8
3.2. Materialer	10
4.0. Termionisk Elektricitet	10
4.1. Indledning	10
4.2. Materialer	11
5.0. Varmekilder	14
5.1. Indledning	14
5.2. Radioisotoper	14
6.0. SNAP-systemerne	16
6.1. Indledning	16
6.2. Isotopsystemer	19
6.3. Reaktorsystemer	23
7.0. Referencer	31
Appendiks: Oversigt over isotopgeneratores udvikling i Europa.	32

1.0. Indledning

Elektricitet fremstilles i dag næsten på samme måde som for 50 år siden. Varme i form af damp fra en kedel eller en nuklear reaktor sendes til en varmemaskine (dampturbine), som driver en generator, hvorfra den frembragte elektricitet aftappes. Ved fremkomsten af nukleare reaktorer og rumskibe er behovet for mere direkte og simple metoder til fremstilling af elektricitet blevet forstærket.

Ved hjælp af nye materialer og en bedre forståelse af faststoffysikken (solid state) og plasmafysikken er det nu muligt at fremstille elektricitet direkte fra varme ved hjælp af 3 forskellige metoder nemlig den magnetohydrodynamiske (MHD), den termoelektriske- og den termioniske metode.

Det magnetohydrodynamiske system arbejder efter samme princip som en konventionel generator, men i stedet for den faste leder, som roterer i et magnetisk felt, benyttes en jet af en ioniseret gas eller af et plasma med en temperatur på $2000 - 3500^{\circ}\text{C}$. Den opnåelige effekt kan være fra 1-1000 MW, og den teoretisk mulige virkningsgrad er ca. 60%.

Det termoelektriske system benytter en avanceret form for et termoelement, som frembringer en elektrisk strøm i et kredsløb bestående af to forskellig ledende materialer, når disses grænseflader holdes på forskellige temperaturer. Det er teoretisk muligt at opnå en virkningsgrad på omkring 36%. I øjeblikket er virkningsgraden dog kun 15-20% med materialetemperaturer på $1100 - 1500^{\circ}\text{C}$. Effekten kan være fra 1 watt til 10 kW.

Det termioniske system virker som et radorør. I et vakuum eller en ioniseret gas koger elektroner væk fra en katode, som er opvarmet til omkring 1600°C , og strømmer derfra tværs over en spalteåbning til en anode, hvorved der frembringes en elektrisk spænding og en deraf resulterende strøm. Der er bygget termioniske generatorer med op til ca. 500 watt i effekt og en virkningsgrad på 21%. Teoretisk er det muligt at opnå en virkningsgrad på 38%.⁽¹⁾

De ovenfor omtalte 3 metoder til at omdanne varme direkte til elektricitet har foruden muligheden for høje virkningsgrader også den fordel at være meget fleksible. De har ingen bevægelige dele og er derfor uafhængige af tyngdekraften - af stor vigtighed i rumfarten-, er lydløse og kompakte.

Den største drivkraft bag ved den evige søgen efter nye metoder til fremstilling af elektricitet er dog ønsket om at opnå højere virkningsgrader. Dampturbinen er højt udviklet og har ikke mulighed for større forbedringer i virkningsgrad. Den maksimale virkningsgrad η af et kreds-

løb, hvori varme fra en varmekilde med en temperatur på T_v delvis omdannes til arbejde og delvis tabes til et koldt niveau ved en temperatur på T_k er ifølge Carnot's ligning:

$$\eta = \frac{\text{Arbejde udført}}{\text{Varme tilført}} = \frac{T_v - T_k}{T_v}$$

hvor temperaturene T er absolutte.

Man kan i dag i moderne konventionelle kraftværker opnå en virkningsgrad på ca. 35%. Det bedste man kan forvente i fremtiden ved brug af dampturbiner er formentlig 45 - 50%.

2.0. Det magnetohydrodynamiske system (MHD)

2.1. Indledning

MHD-princippet for direkte omdannelse af varme til elektricitet kræver, at den benyttede gas holdes på en meget høj temperatur og er en god elektrisk leder. I sin simpleste form, det såkaldte linærflow-krydsfelt system (se fig. 1), fremstilles den varme gas ved forbrænding af fast eller flydende brændsel eller ved at gassen opvarmes i en nuklear reaktor. Gassen gøres ledende ved at tilsætte små mængder af let ioniserende materialer (seeding) såsom cæsium eller kalium. Ved at ekspandere den varme gas gennem en dyse acceleres gassen til en høj hastighed (ca. 1000 m/sek.). Den strømmer derefter forbi polerne af en kraftig magnet, hvorved der frembringes en elektromagnetisk kraft i gassen vinkelret på både magnetfeltet og gassens bevægelsesretning. Elektricitet i form af jævnstrøm kan derfor udtages ved at anbringe elektroder i den varme gasstrøm. Processen kan beskrives ved hjælp af følgende ligning:

$$i = (V \cdot H - E) \sigma$$

hvor i er strømmen pr. volumenenhed, V er gassens hastighed, E er det modvirkende elektriske felt, σ er den elektriske ledeevne, og H er magnetfeltets styrke. ⁽¹⁾

Da der ikke benyttes bevægelige dele, som altid er mere følsomme overfor varme end stillestående dele, kan varmekildens temperatur være så høj som 3500°C. Carnot's virkningsgrad for et MHD-system kan derfor teoretisk blive meget høj (ca. 60%). Virkningsgraden er dog i praksis begrænset af, at afstrømningstemperaturen T_k ikke må være for lav, da gassen, når den afkøles til 1800-2000°C, mister sin elektriske ledeevne.

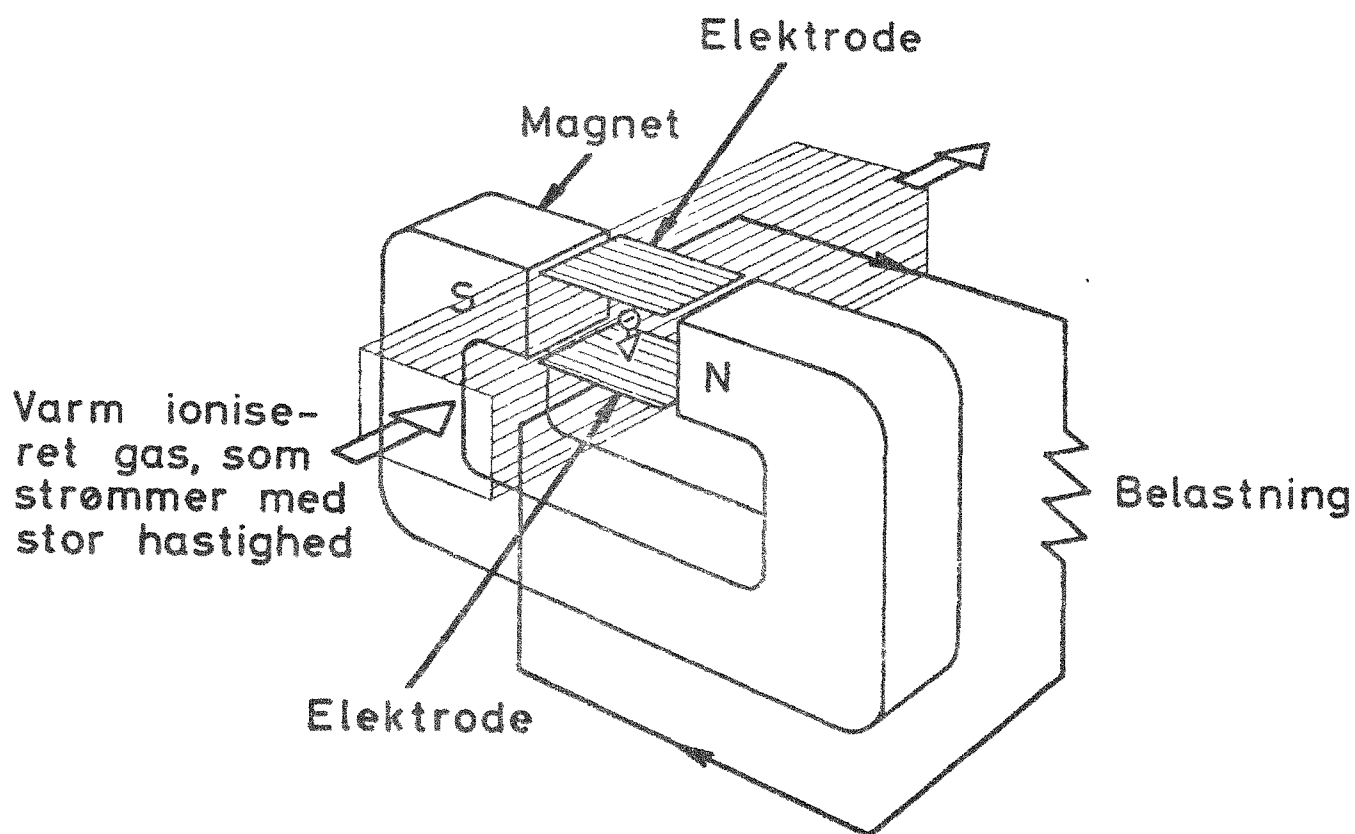


Fig. 1. MHD linær flow-krydsfelt system (skematisk)

Skitsen viser, at MHD-generatoren arbejder efter samme princip som en konventionel generator, men i stedet for den faste leder, som roterer i et magnetisk felt, benyttes en jet af en ioniseret gas. Gassen strømmer forbi polerne af en kraftig magnet, hvorved der frembringes en elektromagnetisk kraft i gassen vinkelret på både magnetfeltet og gassens bevægelsesretning. Elektricitet udtages ved at anbringe elektroder i den varme gasstrøm.

2.2. Materialer til MHD-systemet

På grund af den høje gastemperatur, som er nødvendig ved MHD, er det vanskeligt at finde brugbare materialer. Elektroderne, som bliver meget varme, må have en høj elektrisk ledeevne. MHD-kanalens foring skal være både elektrisk - såvel som termisk isolerende. Desuden skal det magnetiske felt være meget kraftigt.

Indtil 1959 var det kun lykkedes at holde MHD-systemer igang i nogle få sekunder, inden generatorens kanaler brændte af, men i 1959 kom det store gennembrud, da det lykkedes videnskabsmænd fra Westinghouse, USA, at holde et MHD-system igang i ca. 10 minutter, medens det udviklede en effekt på 10 kW ved 30 volt jævnstrøm. (2)

Gassens elektriske ledeevne har stor betydning, da MHD-effekten, P , er direkte proportional med den elektriske ledeevne, σ . Dette fremgår af ligningen:

$$P = \sigma \cdot V^2 \cdot H^2 \cdot \frac{B}{2} \left(1 - \frac{B}{2}\right)$$

hvor B er en belastningsparameter. (2)

Som tidligere omtalt, kan en gasarts elektriske ledeevne forøges ved at tilsætte en mindre mængde (ca. 1%) af et let ioniserende metal såsom: cæsium eller kalium. Betydeligt højere værdier af den elektriske ledeevne kan dog opnås ved at benytte chokbølger. Herved kan man opnå 20-30% ionisering i sammenligning med ca. 1% ionisering ved brugen af "seeding". I fig. 2 ses et sådant MHD-system, hvor chokbølger i den ioniserede gas strømmer ned gennem en ca. 40 m lang tunnel med en MHD-generator. Chokbølgernes hastighed er Mach 30, og der frembringes store elektricitetsmængder som kortvarige impulser.

Megen opmærksomhed vides MHD-generatorer med lukkede kredsløb, da dette system kan benyttes i forbindelse med en nuklear reaktor. I et lukket MHD-kredsløb ledes afstrømningsgassen fra generatoren ikke ud i atmosfæren, som det er tilfældet i et forbrændingssystem, men forbliver i kredsløbet og opvarmes på ny f.eks. i en reaktor (fig. 3). Her skal også omtales et specielt MHD-kredsløb, som benytter et 2-væske system, under udvikling hos California Institute of Technology, USA. I dette system benyttes et flydende metal som elektrisk leder. Metallet accelereres af en anden væske i en dyse. Dette system har ret lav virkningsgrad nemlig omkring 10%. (1)

Da der mange steder i verden er et stort MHD-forsknings og -ud-

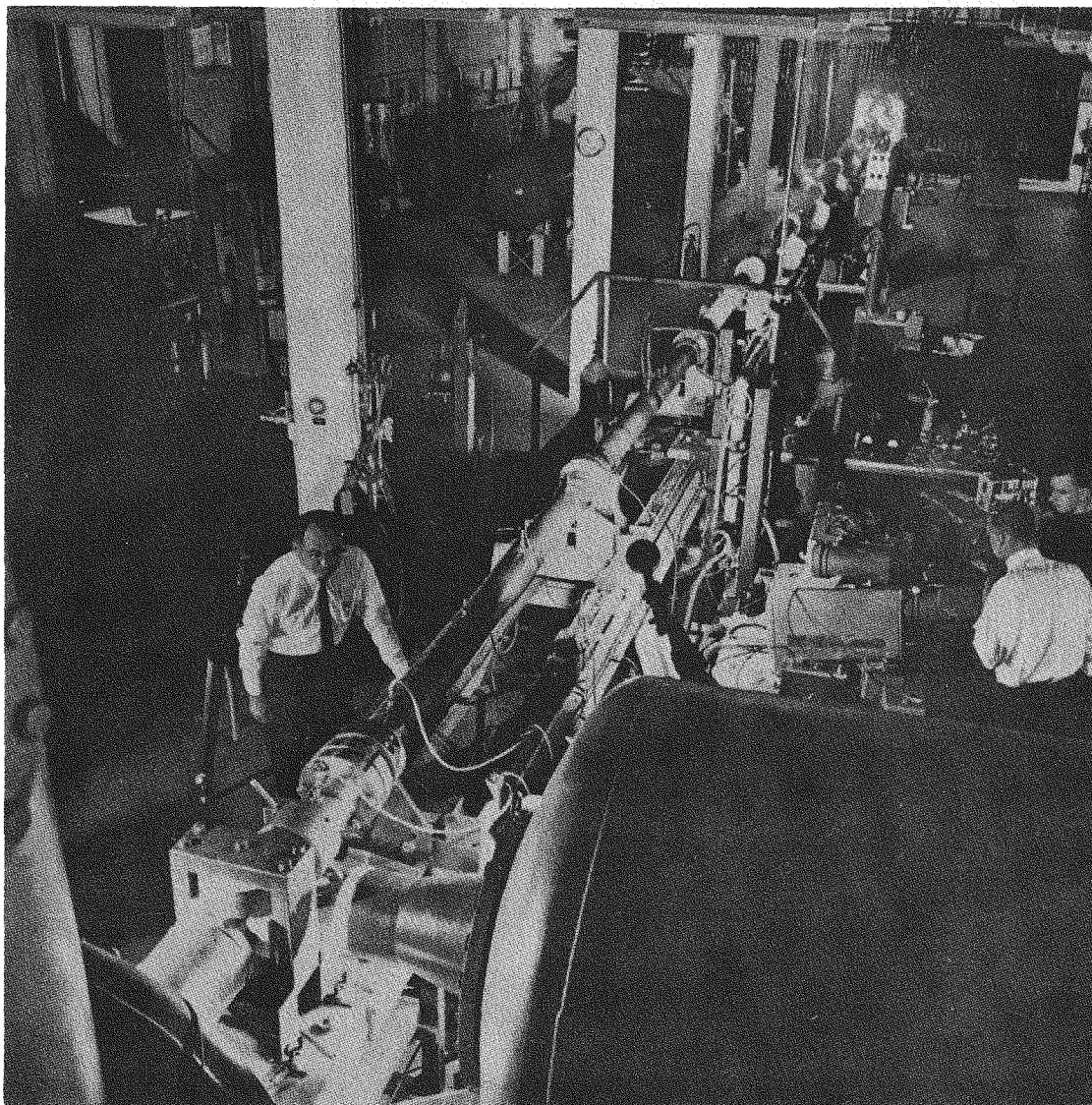


Fig. 2. MHD-system med chokbølger

Billedet viser et MHD-system i G.E. Research Laboratory, USA. Chokbølger i den ioniserede gas strømmer ned gennem en ca. 40 m lang tunnel med en MHD-generator, som ses nederst til venstre. Chokbølgerne hastighed er Mach 30, og der frembringes store elektricitetsmængder som kortvarige impulser.

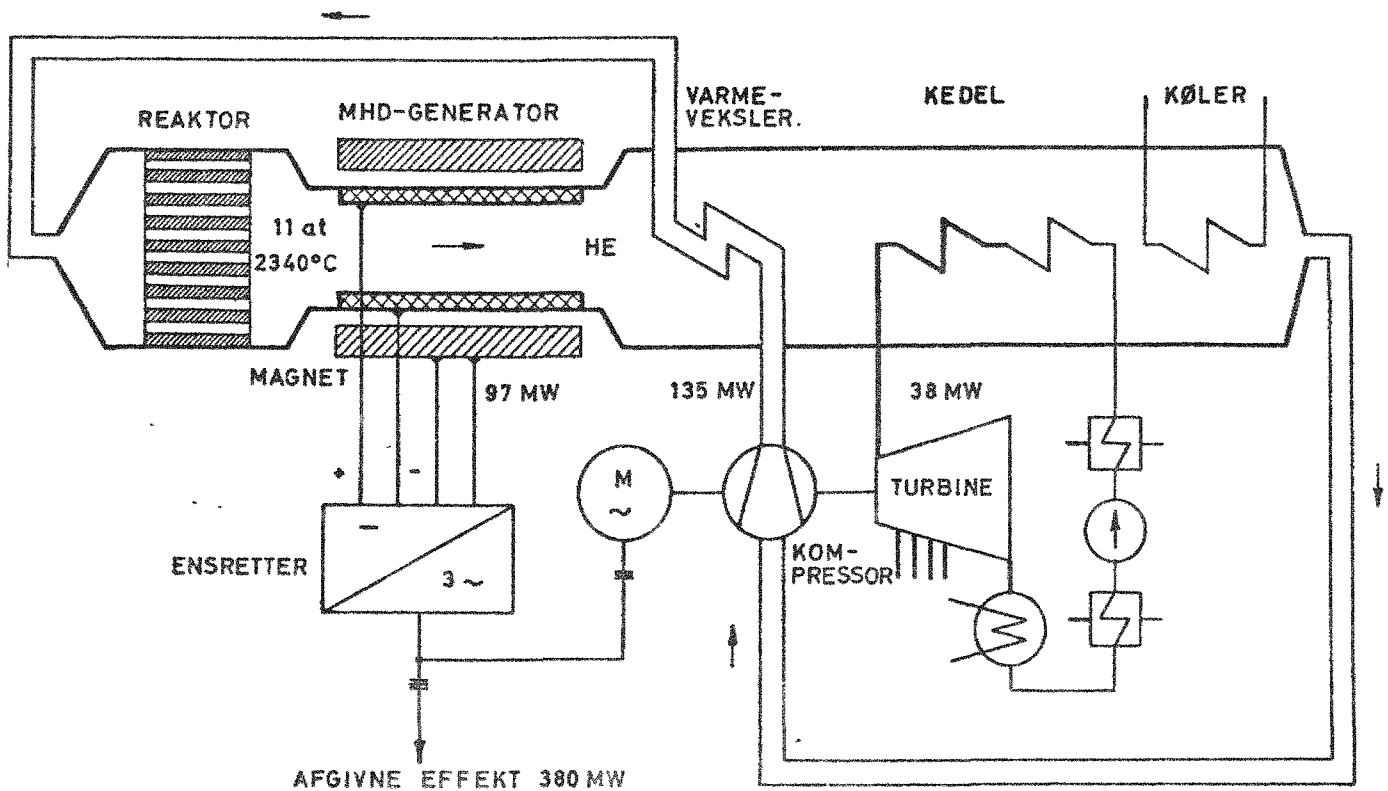


Fig. 3. Et lukket MHD kredsløb med en nuklear reaktor

I et lukket MHD-kredsløb ledes afstrømningsgassen fra generatoren ikke ud i atmosfæren, som er tilfældet i et forbrændingssystem, men forbliver i kredsløbet og opvarmes på ny f. eks. i en reaktor.

viklingsprogram igang, kan man forvente, at et praktisk anvendeligt MHD-system vil blive udviklet indenfor de nærmeste år.

3.0. Termoelektricitet

3.1. Indledning

Direkte overførelse af varme til elektricitet ved hjælp af en termoelektrisk generator eller termoelement blev opdaget i 1822 af T.J. Seebeck, da han frembragte en spændingsforskel mellem 2 forskellige ledere ved at opvarme den ene af deres forbindelser og ved at nedkøle den anden forbindelse (se fig. 4). Almindelige termoelementer til temperaturmåling er ikke velegnede til elektricitetsfremstilling på grund af deres dårlige virkningsgrad, mindre end 1%.

Et termoelektrisk materiales virkningsgrad afhænger især af 3 egenskaber, nemlig - den elektriske modstand, Seebeck-spændingen og varmeledningsevnen. Et mål for et materiales effektivitet er Joffe's tal (figure of merit) Z , som forholder sig til de ovenfor omtalte 3 materialeegenskaber på følgende måde:⁽¹⁾

$$Z = \frac{S^2}{\epsilon \cdot k} = \frac{S^2 \cdot \sigma}{k}$$

hvor S = Seebeck spænding, $V/^{\circ}C$

k = varmeledningsevne, watt/cm $^{\circ}C$

ϵ = elektrisk modstand, ohm cm

σ = elektrisk ledeevne, ohm $^{-1}$ cm $^{-1}$

Da en termoelektrisk generator er en varmemaskine, som arbejder mellem temperaturerne T_{varm} og T_{kold} , indgår såvel Carnot's virkningsgrad som termoelementets virkningsgrad, således at den totale virkningsgrad bliver:⁽¹⁾

$$\eta_{\text{total}} = \eta_c \cdot \eta_{\text{Te}}$$

$$\text{hvor } \eta_c = \frac{T_v - T_k}{T_v} = \frac{\Delta T}{T_v} \quad \text{og}$$

$$\eta_{\text{Te}} = \frac{\sqrt{1 + T_M \cdot Z} - 1}{\sqrt{1 + T_M \cdot Z} + \frac{T_k}{T_v}}$$

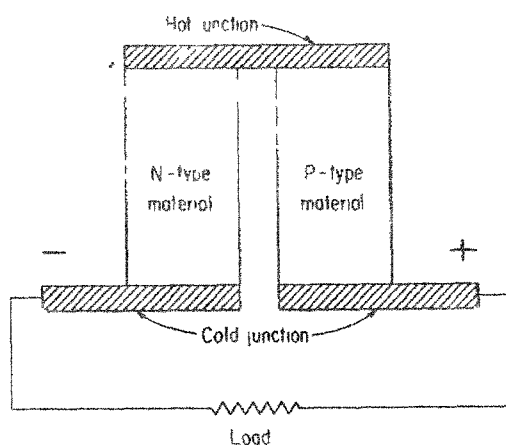
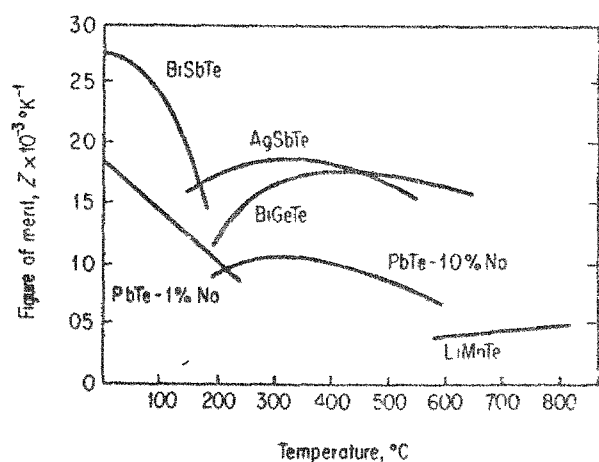


Fig. 4. Termoelektrisk system (skematisk)

Det termoelektriske system benytter en avanceret form for et termoelement, som frembringer en elektrisk strøm i et kredsløb bestående af to forskellige ledende materialer (P og N), når disses grænseflader holdes på forskellige temperaturer.

P-materialer



N-materialer

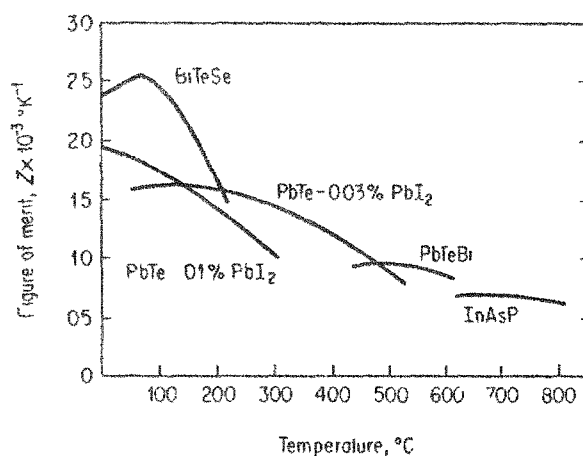


Fig. 5. Termoelektriske materialer

Det ses af figurerne, at intet materiale arbejder effektivt over et større temperaturområde.

hvor $T_M = \frac{T_v + T_k}{2}$

hvoraf

$$\eta_{\text{total}} = \frac{\Delta T}{T_v} \cdot \frac{\sqrt{1 + T_M \cdot Z} - 1}{\sqrt{1 + T_M \cdot Z} + \frac{T_k}{T_v}}$$

Det ses af ovenstående ligning, at for at opnå en høj virkningsgrad må man benytte materialer med høje Joffe's tal (Z), og som er i stand til at arbejde ved høj temperatur (høj T_c). Det er i øjeblikket muligt at opnå totale virkningsgrader på omkring 20%. Det er dog teoretisk muligt at nå op på ca. 36% ved at udvikle bedre materialer og ved at benytte flere forskellige materialer i termisk serie, hvorved forstås et lagdelt element bestående af vekslende materialer.

3.2. Materialer

Nogle af de mest benyttede materialer i termoelektriske generatorer er vist i fig. 5. Det ses heraf, at ingen positive, (P)-materialer, eller negative, (N)-materialer, arbejder effektivt over et større temperaturområde, men at hvert materiale har sit afgrænsede temperaturområde. De mest benyttede materialer er Bi_2Te_3 , PbTe , ZnSb og GeTe .

Der er stadigvæk mange problemer at overvinde ved udvikling af termoelektriske generatorer såsom kemisk og metallurgisk forenelighed mellem forbindelsesmaterialer og termoelektriske materialer, men da der foregår et stort forsøgs- og udviklingsarbejde, som hele tiden frembringer nye og forbedrede materialer, vil termoelektriske generatorer få større og større betydning som mindre kraftkilder.

4.0. Termionisk Elektricitet

4.1. Indledning

Den termioniske virkemåde er baseret på, at elektroner forlader metaller, når disse holdes på høje temperaturer. Dette er først opdaget af Thomas Edison og resulterede i opfindelsen af vakuumrøret. I 1956 undersøgte professor G. N. Hatsopoulos (MIT-USA) mulighederne for at frembringe elektricitet ved hjælp af det termioniske princip. I 1957 byggede U.C. Wilson, General Electric, USA, en termionisk generator, som opnåede en virkningsgrad på 8%. Siden da er der sket en betydelig udvikling gen-

nem forsøg, og man er nu nået op på virkningsgrader på omkring 18-20%.

En termionisk generator, som er vist skematisk på fig. 6, består af en elektronafgiver, en katode, som er opvarmet til en høj temperatur, og som derfor afgiver elektroner. Disse elektroner har en så høj energi, at de kan strømme tværs over en spalte til en kølet elektronopsamler, en anode. Elektronernes kredsløb er vist på fig. 7. Normalt befinder elektronerne sig på Fermi-energiniveauet, men ved opvarmning opnås en så høj energi, at både katodeoverfladens barriere ϕ_c (work function) og spalterummets barriere ϕ_k , forårsaget af de tidligere afgivne elektroner, kan overvindes. Den frembragte forskel mellem Fermi-energiniveauerne af katode og anode skaber en spændingsforskell på fra 1 til 3 volt. Den termioniske generator er således en varmemaskine, hvor elektronerne optræder som arbejdsmediet.

Hvordan en termionisk generator arbejder

Den maksimale strøm J_c , som afgives af katoden ved temperaturen T_c , kan findes ved hjælp af Richardson's ligning:

$$J_c = A \cdot T_c^2 \cdot \exp(-e \cdot \phi_c / k \cdot T_c)$$

hvor A = konstant, 120 amperer/cm²/°K
 T_c = katode temperatur, °K
 e = elektronladning, $1,591 \cdot 10^{-17}$ coulomb
 ϕ_c = katodens arbejdsfunktion, volt
 k = Boltzmanns konstant, $8,61 \cdot 10^{-5}$ V/°K

Det ses af ligningen, at for at opnå en høj katodestrøm må katoden have en lav arbejdsfunktion ϕ_c og en høj temperatur T_c .

Da anoden holdes nedkølet i forhold til katoden, afgiver den kun få elektroner. Strømmen gennem den termioniske generator er derfor hovedsagelig kontrolleret af katodens egenskaber og elektrontransportmekanisme. Den afgivne spænding afhænger også af transportmekanismen og desuden af anodens arbejdsfunktion ϕ_a .

4.2. Materialer

Et af de største problemer ved udvikling af en termionisk generator med høj virkningsgrad er spaltebarrieren ϕ_k , som skal være mindst mulig. Der er to måder at gøre dette på, nemlig 1) reducere spalten mellem katode og anode til det mindst praktisk mulige, det vil sige nogle få

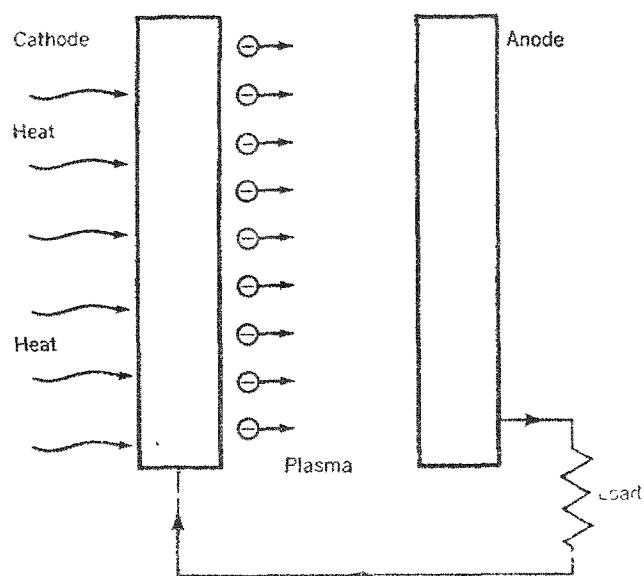


Fig. 6. Termionisk system (skematisk)

Den termioniske virkemåde er baseret på, at elektroner forlader metaller, når disse holdes på høje temperaturer. Elektronerne har en så høj energi, at de kan strømme tværs over en spalte til en kølet elektronopsamler, en anode.

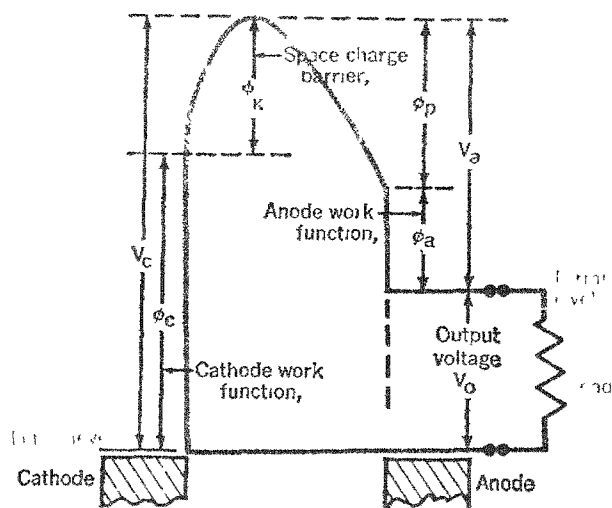


Fig. 7. Elektronernes kredsløb

Normalt befinder elektronerne sig på Fermi-energiniveauet, men ved opvarmning opnås en så høj energi, at både katodeoverfladens barriere ϕ_c (work function) og spalterummets barriere ϕ_k kan overvindes. Den frembragte forskel mellem Fermi-energiniveauerne af katode og anode er spændingsforskellen V_o . ϕ_p er en spændingsforskelle frembragt af modstanden i elektrongassen.

tusindedele af en millimeter og 2) neutralisere spalten ved at indføre positive ioner.

Ved den første metode fremstilles en vakuumgenerator og ved den anden metode en cæsiumgenerator. Der er dog udviklet termioniske generatorer, som benytter begge metoder. Cæsiumdampen i den termioniske celle tjener 3 formål: 1) at formindske spaltebarrieren ϕ_k , 2) at dække katodeoverfladen med cæsium og derved reducere arbejdsfunktionen og derved forøge elektronafgivelsen, og 3) at dække anodens overflade og derved reducere også dennes arbejdsfunktion.

Brugen af positive cæsium-ioner til at neutralisere den negative spalteladning er resulteret i generatorer med væsentligt højere virkningsgrader, op til 21%, end det er muligt at opnå i vakuumgeneratorer, for hvilke virkningsgraden er fra 4-6%. Dr. Wilson og dr. Lawrence fra General Electric har med en cæsiumgenerator opnået en virkningsgrad på 21% ved 21,6 W/cm² og en katodetemperatur på 1972°C. En af ulemperne ved brugen af cæsiumdamp til at neutralisere spalteladningen er, at cæsium kemisk set er meget aktivt. Dette medfører, at der kan være store korrosionsproblemer, som kan nedsætte generatorens levetid.

Virkningsgraden af en termionisk generator kan beregnes af:

$$\eta = \frac{\phi_c - \phi_a}{\phi_c + 2kT_c + R/J}$$

hvor ϕ_c = katodens arbejdsfunktion, volt

ϕ_a = anodens arbejdsfunktion, volt

kT_c = elektronenergien ved katoden, volt

R = varmestralingstabet, watt

J = strømstyrken, ampere

Det ses af ligningen, at for at opnå en høj virkningsgrad må man have høje værdier af ϕ_c og J og lave værdier af R . Da strømtætheden J vokser med katodetemperaturen, er man interesseret i at arbejde med en høj katodetemperatur. Dette stiller store krav til katodematerialerne, og man benytter derfor metaller med høj smeltepunkt, såsom wolfram, tantal og molybdæn.

Termioniske generatorer er kompakte, enkle i konstruktion, brugbare sammen med mange forskellige varmekilder og er i stand til at arbejde med høj effekt i lange perioder. De arbejder med katodetemperaturer fra 1175°C til 2200°C, fra nogle få watt til over 500 watt, med virkningsgrader på ca. 20% i mere end 8000 timer.

5.0. Varmekilder

5.1. Indledning

Brugen af radioaktive materialer som varmekilder ved fremstilling af elektricitet er en af de mest interessante udviklinger inden for atomenergien i de senere år. Radioisotoper benyttes nu i afsides beliggende vejrstationer, i bøger på havet, i satellitter og til særlige opvarmningsformål og disse områder kan blive det første marked for forholdsvis større mængder af radioaktive materialer. Selv om velkendte energikilder, såsom kemiske batterier, brændselsceller, solceller o. s. v. stadig vil blive benyttet, er det nu åbenbart, at i det lave effektområde op til omkring 5 kW, vil radioisotopgeneratorer blive benyttet mere og mere, og i enkelte tilfælde vil de være de eneste anvendelige energikilder. Radioaktive materialer er i stand til at afgive varme på en i forvejen kendt måde i længere tidsrum uden at skulle passes og uden nogen udvendige forbindelser, uden større dimensionelle eller kemiske ændringer og med et meget simpelt kontrolapparat. Ved effekter over ca. 5 kW er det dog nødvendigt at benytte små reaktorer i stedet for radioisotoper.

5.2. Radioisotoper

De mest benyttede radioisotoper i termoelektriske generatorer er strontium 90, cæsium 137, cerium 144, kobolt 60, plutonium 238 og prometium 147. Da de første 4 afgiver ret stærke beta- og gammastråler, må de omgives af mere eller mindre tykke afskærmninger. De 2 sidstnævnte radioisotoper afgiver derimod kun svage alfa- og betastråler og kræver derfor mindre afskærmning end de 4 førstnævnte. I tabel I er vist de vigtigste egenskaber af de mest benyttede radioisotoper, og i tabel II er angivet den årlige produktion, og priserne på nogle af disse.⁽⁵⁾

Tabel I

	<i>Stron- tium 90</i>	<i>Cesium 137</i>	<i>Prome- thium 147</i>	<i>Pluto- nium 238</i>	<i>Cu- rium 244</i>	<i>Cu- rium 242</i>	<i>Polo- nium 210</i>	<i>Cerium 144</i>	<i>Cobalt 60</i>
Type of decay	Beta	Beta- Gamma.	Beta	Alpha	Alpha	Alpha	Alpha	Beta- Gamma.	Beta- Gamma
Half Life, years	28	30	2.7	89	18	0.45	0.38	0.78	5.3
Specific Power of Isotope, th. watts/gram.	0.90	0.42	0.33	0.56	2.8	120	141	25.6	17.4
Estimated Isotopic Purity, %	50	35	95	80	98	90	95	18	10
Typical Fuel Form	SrO	Glass	Pm ₂ O ₃	PuO ₂	Cm ₂ O ₃	Cm ₂ O ₃	Metal	CeO ₂	Metal
Active Isotope in Compound, %	12	16	82	71	89	82	95	15	10
Specific Power of Compound, th. watts/gram.	0.38	0.067	0.27	0.39	2.49	98	134	3.8	1.7
Density of Compound, gm/cc	3.7	3.2	6.6	8.9	10.6	11.75	9.3	6.4	8.9
Power Density of Compound, th. watts/cc.	1.40	0.21	1.8	3.5	26.4	1150	1210	24.5	15.5
Shielding Requirement	Heavy	Heavy	Minor	Minor	Moder- ate.	Minor	Minor	Heavy	Heavy
Emission Requiring Shielding	Bremst'ng	Gamma			Neutron			Gamma	Gamma

Reference: Rohrmann, C. A., "Radioisotopic Heat Sources," HW-76323 Revd. October 15, 1963.

Tabel II

Priser og produktion af radioisotoper

Isotop	Årlige produktion i USA million Curie	Pris \$/curie
Strontium 90	3 - 5	0,20
Prometium 147	0,3	0,20
Cerium 144	-	0,15
Cæsium 137	1 - 3,5	0,125

6.0. SNAP systemerne

6.1. Indledning

USA's atomenergikommission begyndte i 1955 et program til udvikling af små atomdrevne kraftkilder til brug først i rumfarten, men senere også til vejrstationer på land og bøjer på havet. Dette program fik navnet SNAP, som er en forkortelse af ordene "Systems for Nuclear Auxiliary Power", og som kan opdeles i radioisotoper eller reaktorer som varmekilder med termoelektrisk eller termioniske generatorer.

En oversigt over SNAP systemerne er vist i tabel III og IV. ^(1, 3)

Som et eksempel på den hurtige udvikling som foregår på SNAP området kan oplyses, at AEC for nylig sluttede en kontrakt på \$ 10 mill. med Martin-Marietta, USA, om udvikling af en termoelektrisk isotopgenerator på 400 watt (e). Generatoren vil benytte polonium-210 som varmekilde.

Tabel III

Designation	Use	Power output, w*	Weight, lb	Size, in od × in ht	Isotopic fuel	Design life	Operational data
Snap-1A	Air Force satellite	125	175	24 × 34	Cerium ¹⁴⁴	1 yr	Cancelled in 1959
Snap-3	Thermoelectric demonstration	3	4	4.75 × 5.5	Polonium ²¹⁰	90 days	Demonstrated in 1959
Pu ²³⁸ Fueled Snap-3	Transit 4A & 4B satellites	2.7	4.6	4.75 × 5.5	Plutonium ²³⁸	5 yr	Launched in 1961
Snap-9A	Transit 5 satellites	25	25.1	20 × 9.5	Plutonium ²³⁸	6 yr	1963
Snap-11	Surveyor soft lunar landing	21-25	30	20 × 12	Curium ²⁴²	120 days	1965
Snap-13	Thermionic demonstration	12.5	4.5	2.5 × 4	Curium ²⁴²	120 days	Demonstration in 1964
500-w generator (thermionic)	Design study only	500	100-175		Curium ²⁴²	6 mo	
		500	175-225		Plutonium ²³⁸	1-5 yr	
		500	250-300		Curium ²⁴⁴	1 yr	
IMP generator (thermoelectric)	IMP satellite (design only)	22	17	22 × 11 × 10**	Plutonium ²³⁸	3-5 yrs	1964***
Sr ⁹⁰ generator (thermoelectric)	Communications satellites	30	20- 25		Strontium ⁹⁰	5-10 yr	1965***
		60	40- 50		Strontium ⁹⁰	5-10 yr	1965***
		120	70- 80		Strontium ⁹⁰	5-10 yr	1966***
		300	150-175		Strontium ⁹⁰	5-10 yr	1966***

* Raw power from generator. Voltage converter efficiency 75-85% not included.

** In length × in width × in height.

*** First use in space for planning purposes.

Snap isotopsystemer

Tabel IV

System characteristic	Snap-10A	Snap-2	Snap-8	Snap-50 Spur
Development Agency	AEC	AEC	AEC/NASA	AEC/AF
Power output, kwe	0.5	3.0	30-60	350
Reactor power, kwt	32	50	450-600	—
Efficiency, %	1.96	6.0	8	—
Energy conversion	GeSi (thermoelectric)	Mercury Rankine	Mercury Rankine	Potassium Rankine
Voltage	28.5 DC	120 AC		
Boiling temp, °F		900-930	1070	
Av hot-junction temp, °F	900	—	—	
Radiator temp, °F	615	600	580	1100
Radiator area, ft ²	62.5	120	1400-1800	
Unshielded wt, lb	650	1200	4200-4950	5000
Radiation at base, gamma rads	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷ at 15'	
Radiation at base, nvt	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹² at 15'	
Over-all length, ft	10	13		
Diameter at base, ft	5	5		
Availability	1964	1966	1970	1975/80
Reactor characteristic	Snap-10A	Snap-2	Snap-8	Snap-50
Heat power, kwt	35	55	600	
Minimum life, yr	1	1	1.1 ^b	
Length, over-all, in	16	16	19	
Diameter, over-all, in	14	14	15	
Core volume, ft ³	0.3	0.3	0.48	
Power density, kwt/ft ³	99	165	1250	
Weight, lb	270	290	500	
Fuel rods	37	37	211	
Diameter, in	1.25	1.25	0.56	
Hydrogen density, atoms/cm ²	6.5×10^{22}	6.5×10^{22}	6.0×10^{22}	
Atomic burn-up, %	0.02	0.03	0.23	
Max fuel temp, °F	1050	1300	1500	
Heat flux, Btu/hr/ft ²	10,200	17,000	55,000	
Neutron flux, n/cm ² -sec	1.8×10^{11}	3.1×10^{11}	2.3×10^{12}	
Radial reflector (Be), in	2.3	2.3	3.0	
Control drums	4 ^c	4	6	
Coolant ^d				
Temperature out, °F	990	1200	1300	2000
Temperature in, °F	880	1000	1100	

(a) All units use U²³⁵ moderated with zirconium hydride except Snap-50 which uses UC

(b) 10,000 hr.

(c) Startup only.

(d) All use NaK (sodium 78% and potassium 22%) except Snap -50 which uses Lithium as coolant.

6.2. Isotopsystemer

Siden 29. juni 1961 er SNAP generatorer blevet benyttet i rumfarten. Den første, SNAP-3, leverer strøm til navigations-satelitten Transit 4a. Den vejer kun 2,1 kg, er ca. 13 cm i diameter og afgiver en effekt på 2,7 watt. Den er konstrueret til at arbejde i 5 år. Det ville kræve ca. 1 1/3 tons batterier for at udvikle den samme effekt i 5 år. Varmekilden er plutonium 238 i pilleform indesluttet i to cylinderformede stålbeholdere. Fig. 8 viser et billede af SNAP-3 generatoren. I midten ses den cylinderformede varmekilde, og udenom denne er anbragt de termoelektriske elementer, som danner generatoren. Varmen fra varmekilden ledes gennem elementerne ud til den ydre beholder, som tjener som radiator for spildevarmen.

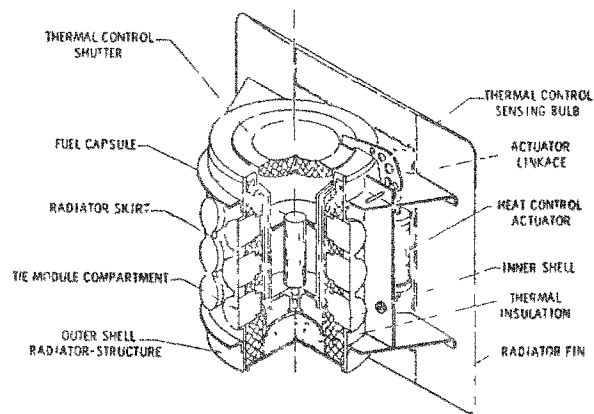
SNAP radioisotop-generatorer med effekter op til 300 watt er nu under udvikling for brug i rumfarten.

Siden december 1961 er SNAP generatorer også blevet benyttet som kraftkilde på havet. Den første var en SNAP-7a, som udvikler ca. 10 watt, og som er installeret i en lysbøje nær Baltimore (fig. 9). Generatorens varmekilde består af 4 kapsler af strontium 90 med i alt 40800 curie. Der er bygget 3 andre af SNAP-7 serien. Den ene af disse driver et tågehorn i Chesapeake-bugten nær Baltimore, den anden leverer energi til en flydende vejrstation i den mexikanske Gulf, og den tredje, SNAP-7F, producerer strøm til lys og lanterner på et olieboeretårn ligeledes i den mexikanske Gulf.

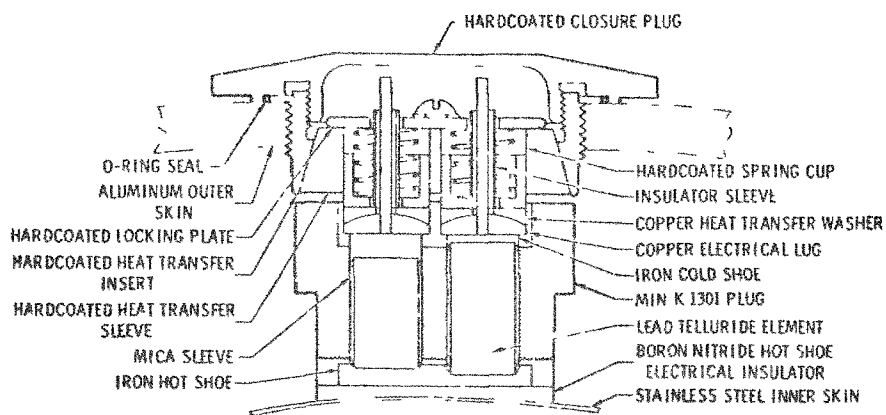
SNAP-7F (fig. 10), som er på 60 watt, er den første kommercielle brug af en strontium-90 generator. Den er 55 cm i diameter og 85 cm høj og vejer 4600 pund. Den er bygget af Martin Co. i samarbejde med Philips Petroleum Co. og er konstrueret til at arbejde i 5 år uden nyt brændsel. Det er meget længere end levetiden af de hidtil benyttede dieselgeneratorer og batterier.

AEC anslår at sådanne generatorer som SNAP-7F kan fremstilles for ca. \$ 25000 (kr. 175000).⁽⁵⁾

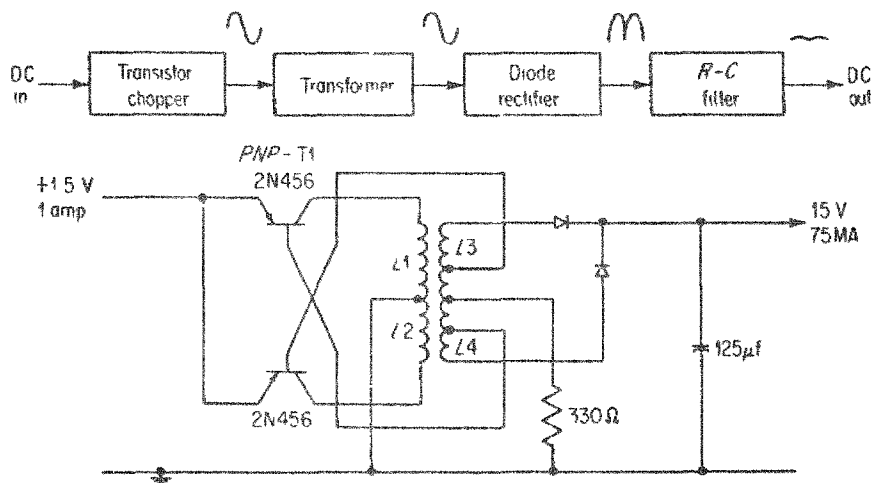
I modsætning til de hidtil omtalte SNAP radioisotop-generatorer som benytter et termoelektrisk system, er SNAP-13 et termionisk system med en effekt på 13 watt. Den benytter curium 242 som varmekilde og er beregnet til at arbejde i 120 dage i rummet. Termioniske systemer kan arbejde ved højere temperaturer end de termoelektriske og har derfor mulighed for at opnå højere virkningsgrad og derfor lavere vægt pr. udviklet watt.



Arrangement



Detaljer af termoelektriske elementer



EL-Diagram

Fig. 8. SNAP-3 generatoren

I midten ses den cylinderformede varmekilde og udenom denne er anbragt de termoelektriske elementer, som danner generatoren. Varmen fra varmekilden ledes gennem de termoelektriske elementer ud til den ydre beholder, som tjener som radiator for spildevarmen.

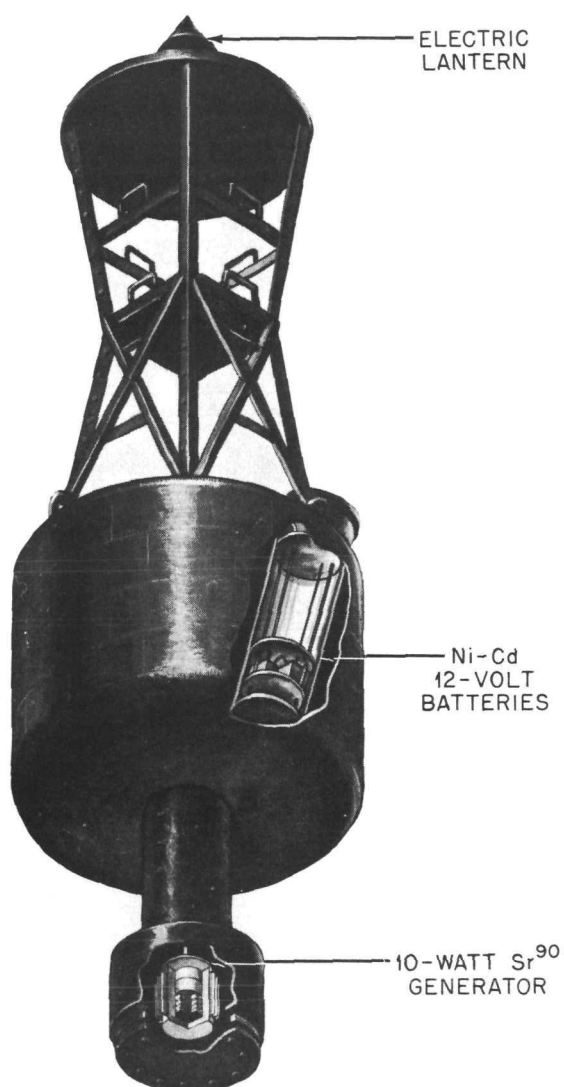


Fig. 9. Lysbøje med isotopgenerator

Siden december 1961 er SNAP-generatorer blevet benyttet som kraftkilder på havet. Den første var en SNAP-7a, som udvikler ca. 10 watt, og som er installeret i en lysbøje nær Baltimore.

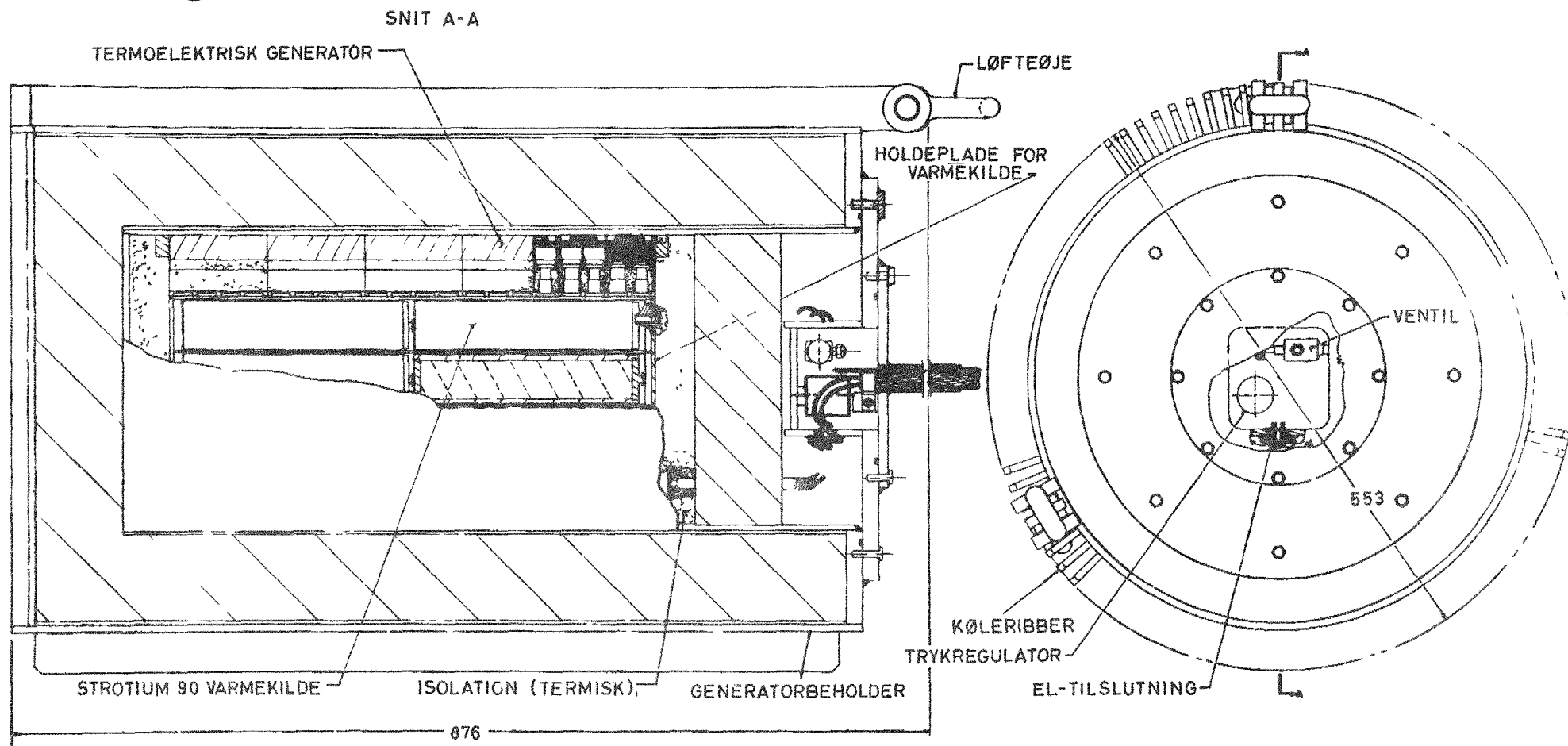


Fig. 10. SNAP-7F isotopgenerator

SNAP-7F, som benytter strontium-90 som varmekilde, har en effekt på 60 watt. Den er konstrueret til at arbejde i 5 år uden nyt brændsel.

6.3. Reaktorsystemer

Den første SNAP reaktor, som blev prøvet i rummet, var SNAP-10A, et 500 watt-system. Den blev prøvefløjet i slutningen af 1964, men ophørte med at producere elektricitet kort efter opsendelsen. SNAP-10A er vist i fig. 11. Den består af en kerne af højt beriget uran-zirkonium brændsel indkapslet i hastelloy rør. Kernen, som er 35 cm i diameter og 40 cm høj, køles af natrium-kalium (NaK). Kernen er omgivet af en 5 cm tyk beryllium reflektor. Reaktorens varme føres af kølemidlet fra kernen til en termoelektrisk generator, og spildevarmen strømmer herfra til radiatoren og ud i rummet.

Andre SNAP reaktorsystemer er under udvikling nemlig SNAP-2, -8 og -50. SNAP-2 er et 3 kW system, som benytter en kviksølv-gasturbo-generator. SNAP-8 (fig. 12), som er et 30 kW system, er en videre udvikling af SNAP-10A. SNAP-50 er på et tidligt stadium og vil formentlig udvikle omkring 1000 kW.

Foruden de ovenfor omtalte systemer foregår der også en udvikling af termioniske reaktorer. Disse reaktorer kan have de termioniske elementer anbragt inde i kernen (in-pile) eller uden for kernen (out-of-pile) (fig. 13). Hvis de er inde i kernen kan selve brændslet være katoden eller elektronafgiverne opvarmes indirekte af brændslet. I de fleste in-pile systemer er brændslet anbragt inden i de termioniske elementer; der findes dog også et system, hvor brændslet er anbragt uden om elementerne. Hvis de termioniske elementer er uden for kernen, kan de enten være anbragt på ydersiden af reaktoren med direkte varmetilførsel ved ledning eller få tilført varme fra flydende metal, som opvarmes af reaktoren.

Som eksemplar på de ovenfor omtalte out-of-pile termioniske reaktorsystemer kan nævnes STAR (Space Thermionic Auxiliary Reactors), som udvikles af General Electric. Hoveddataene for disse STAR systemer er vist i tabel V.⁽¹⁾

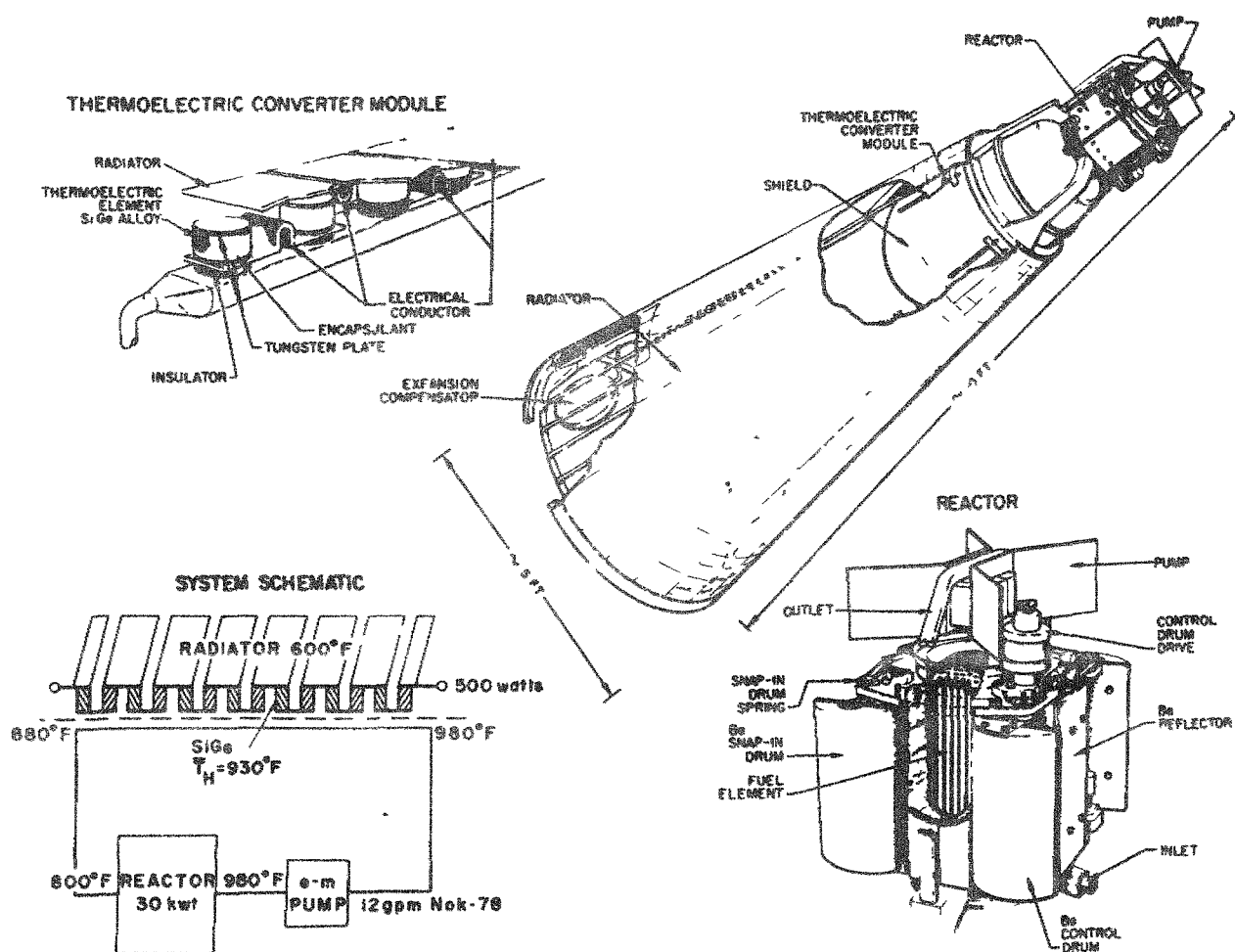


Fig. 11. SNAP-10A systemet

Reaktorkernen, som er 35 cm i diameter og 40 cm høj, køles af NaK. Brændslet er højt beriget uran-zirkonium indkapslet i hastelloy rør. Kernen er omgivet af en 5 cm tyk beryllium reflektor. Reaktorens varme føres af kølemidlet fra kernen til en termoelektrisk generator, og spildevarmen strømmer herfra til radiatoren og ud i rummet

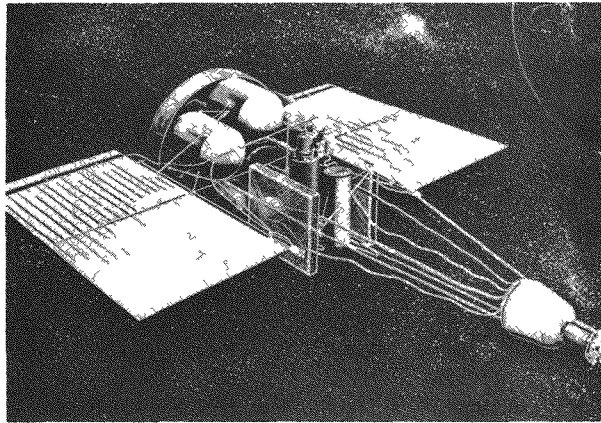


Fig. 12. SNAP-8 systemet

SNAP-8, som er et 30 kW system er en videre udvikling af SNAP- 10A.

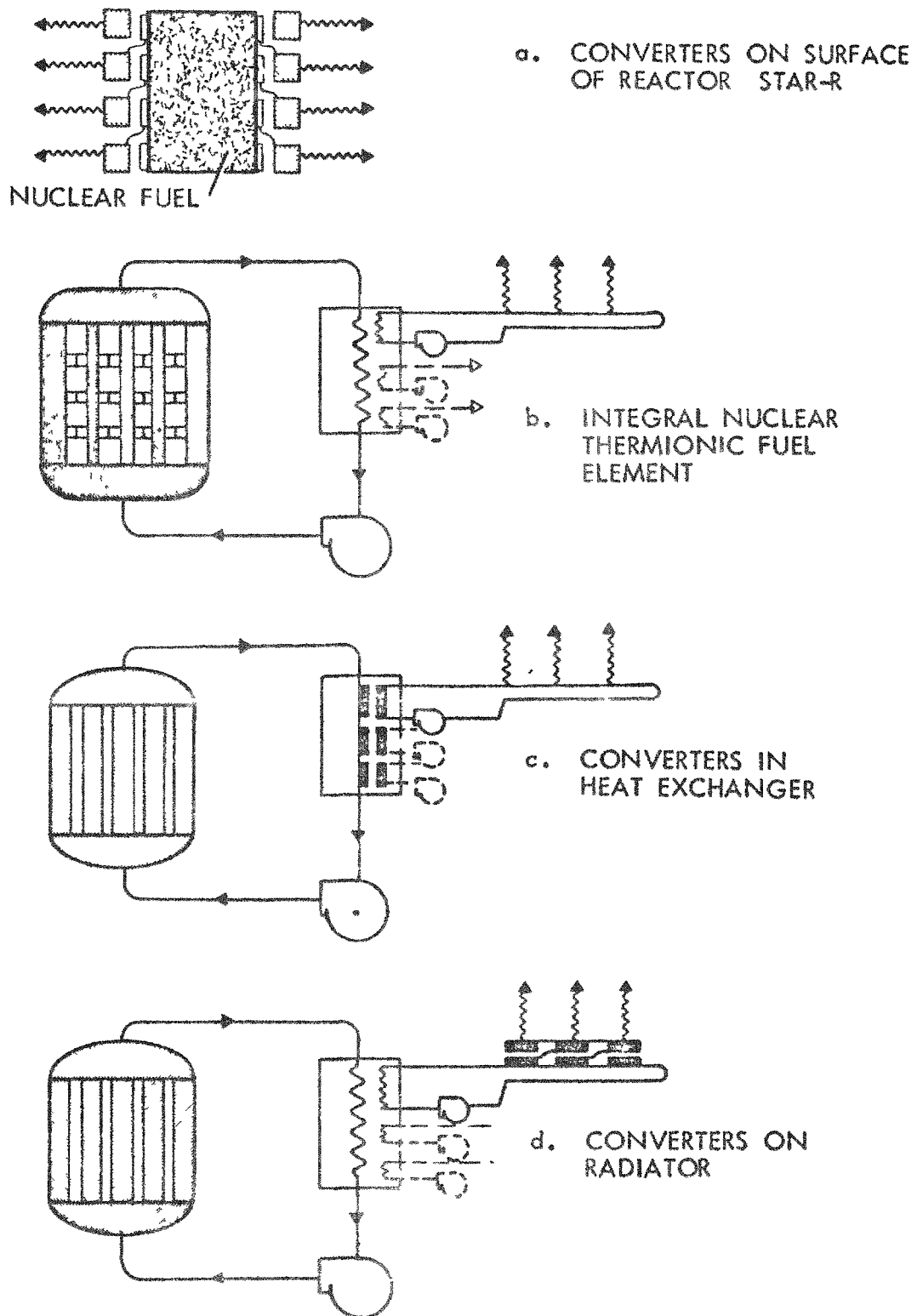


Fig. 13. Termioniske reaktorsystemer (skematisk)

Tabel V

STAR systemer

	Weight, lb	Electric power, kw	Temperature, C			Spec. weight, lb/kw	Length, in.	Diame- ter, in.
			Fuel	Cathode	Reflector surface			
STAR-R								
Current model	1300-1400	13	2190	2030	1020	100	36	13
Prototype	1300-1400	20	2200	2030	1290	65	36	13
Final model	1300-1400	70	2430	2230	1550	19	36	13
STAR-C								
Final model	5000					5		

STAR-R (fig. 14) er strålingskølet ved at de termioniske elementer er anbragt på reaktorens yderside. Reaktoren er en hurtig reaktor, som indeholder ca. 200 kg U-235 som UO_2 og opblandet med wolfram eller rhenium. STAR-C (fig. 15) har forceret køling ved hjælp af et flydende-metal-kredsløb, som benytter en elektromagnetisk pumpe. De termioniske elementer er anbragt inde i kernen. Spildevarmen fra den termioniske generator ledes til særlige radiatorer. Systemet er konstrueret til at udvikle ca. 1000 kW med en vægt på ca. 2300 kg.

I 1959 lykkedes det dr. G.M. Grover og hans medarbejdere på Los Alamos Laboratory at udvikle den første elektricitet fra nuklear fissionsvarme. Deres apparat, som er vist på fig. 16, bestod af en katode, som var en cylinder af uran/zirkonium-karbid beriget til 94%. Anoden var rustfrit stål med kobber kølefiner og elementet var fyldt med cæsiumgas. Generatoren blev anbragt i en 5 MW reaktor med en flux på 10^{13} neutroner/cm² s. Den højeste effekt blev målt til 30 watt/cm² med en strøm på 62 ampere/cm² og en virkningsgrad på omkring 15% (1,2,4).

Der er siden 1959 foregået et stort udviklingsarbejde på det termioniske in-pile område. Der er imidlertid mange problemer at overvinde, før en termionisk reaktor med høj virkningsgrad og lang levetid kan bygges. Nogle af de største problemer er: Forandringen af katodens dimensioner på grund af brændslets opsvulming under bestråling; brændslets indflydelse på katodematerialet; fissionsprodukternes udtrængning i cæsiumgassen; og virkningen af den uensartede effektfordeling i reaktoren på de termioniske elementer.

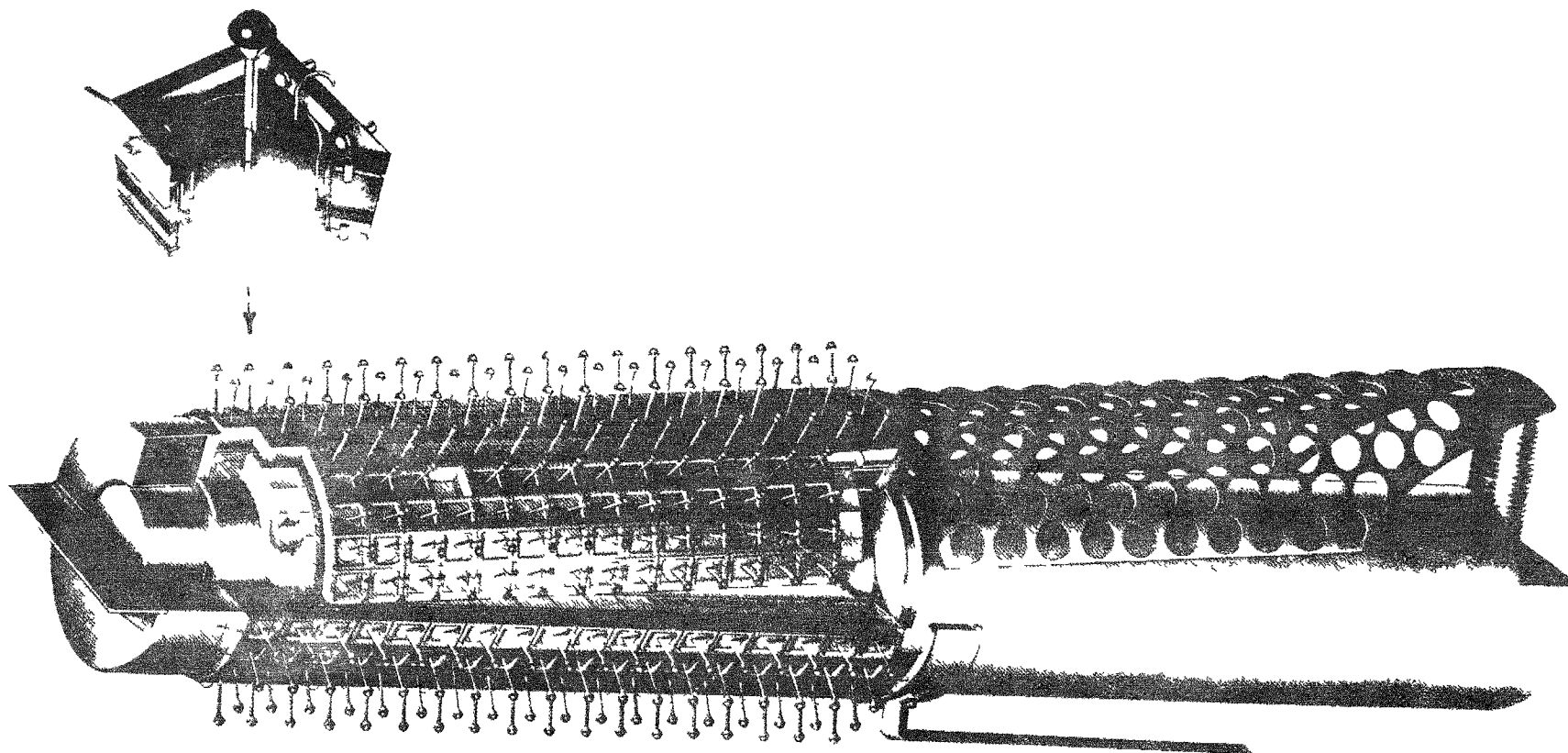


Fig. 14. STAR-R reaktorsystemet (out-of-pile)

STAR-R reaktoren, som er under udvikling af General Electric, er strålingskølet ved at de termioniske elementer er anbragt på reaktorens yderside. Reaktoren er en hurtig reaktor, som indeholder ca. 200 kg U-235 opblandet med wolfram eller rhenium.

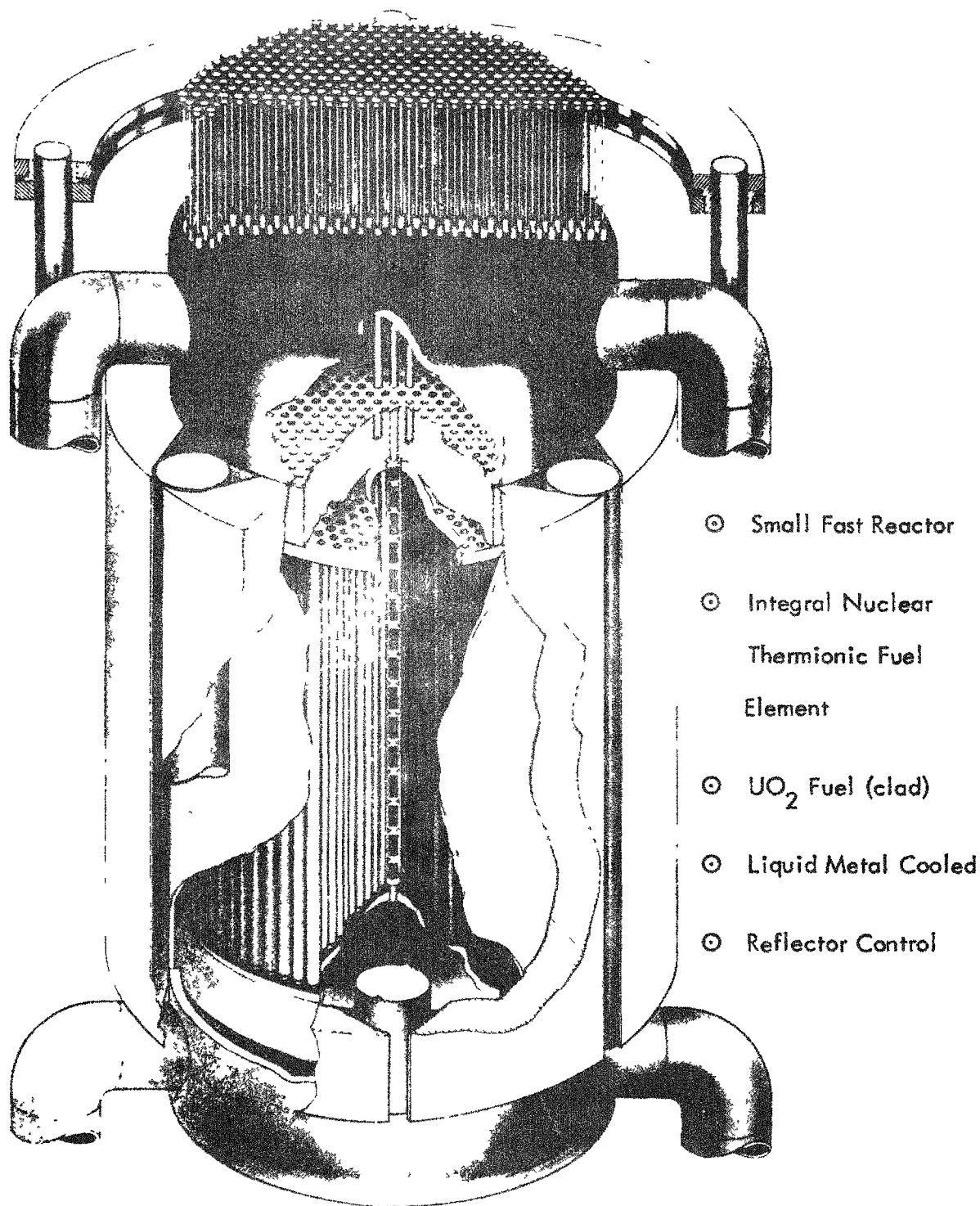


Fig. 15. STAR-C reaktorsystemet (in-pile)

STAR-C har forceret køling ved hjælp af et flydende-metal-kredsløb, som benytter en elektromagnetisk pumpe. De termioniske elementer er anbragt inde i kernen. Spildevarmen fra den termioniske generator ledes til særlige radiatorer. Systemet er konstrueret til at udvikle ca. 1000 kW med en vægt på ca. 2300 kg.

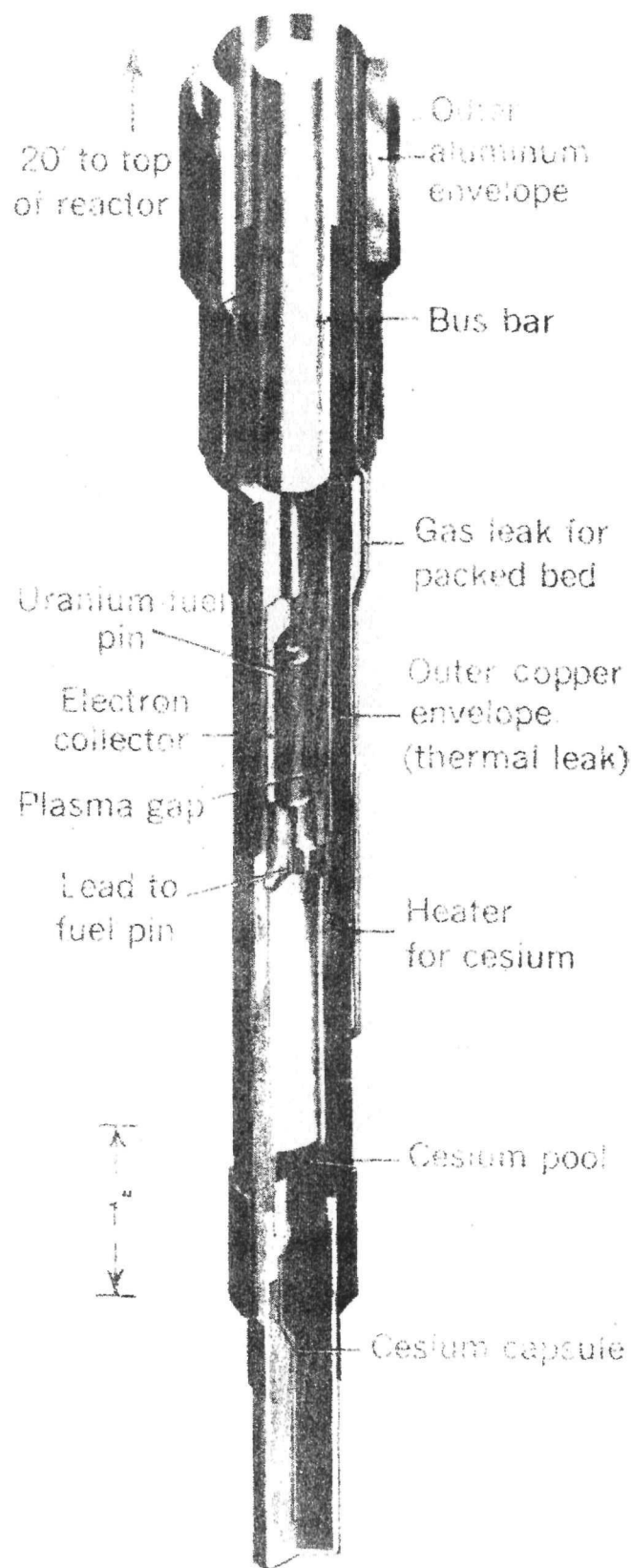


Fig. 16. Termionisk brændselselement

Billedet viser det første termioniske brændselselement, som er konstrueret af Los Alamos Laboratory, USA. Det består af en katode, som er en cylinder af uran/zirkonium-karbid beriget til 94%. Anoden er af rustfri stål med kobber kølefiner og elementet er fyldt med cæsiumgas.

7.0. Referencer

1. E. S. Pedersen, "Nuclear Energy in Space", Prentice-Hall, 1964.
2. I. Fells, "Electricity From Heat", International Science and Technology, March 1962.
3. R. T. Carpenter, "Space Isotopic Power Systems", Astronautics and Aerospace Engineering, Vol. 1, No. 4, May 1963.
4. V. C. Wilson and R. C. Hamilton, "Thermionic Conversion for Space Power", Astronautics and Aerospace Engineering, Vol 1, No. 4, May 1963.
5. U. S. AEC, "An Evaluation of Systems for Nuclear Auxiliary Power", TID-20079, January 1964.

APPENDIKS

Oversigt over isotopgeneratores udvikling i Europa

Indledning

I det følgende gives en kort beskrivelse af udviklingen af isotopgeneratorer i Europa. I tabel VI er vist en oversigt over europæiske isotopgeneratorer og deres nuværende udviklingsstade. Som det fremgår af tabellen benytter 14 af projekterne termoelektriske generatorer og et enkelt en termionisk generator. Omtrent halvdelen af programmerne er til brug i rumfarten, medens resten vil blive benyttet til vejrstationer på landjorden og bølger på havet. Der er mindst 30 laboratorier (private eller statsejede) engagerede i udviklingen af isotopgeneratorer. Hovedorganisationerne i dette arbejde er 1) Euratom (European Atomic Energy Commission), 2) ENEA (European Nuclear Energy Association), 3) IAEA (International Atomic Energy Agency), 4) De nationale atomenergikommissioner og 5) Private firmaer.

De forskellige programmer

Internationale

Euratom begyndte for nogle år siden at udvikle den nødvendige teknologi til brug ved fremstilling af isotopgeneratorer. I 1964 dannede ENEA en studiegruppe bestående af medarbejdere fra de 18 medlemslande. Studiegruppens opgave var at tilrettelægge et bredt udviklingsprogram for isotopgeneratorer til brug både i rumfarten, på landjorden og på havet. IAEA har hovedsagelig påtaget sig at regulere sikkerheden under transport og brug af isotoper. ENEA har udarbejdet planer om at udvikle dynamiske isotopgeneratorer med effekter op til 10 kW (e) og med strontium-90 eller fissionsprodukter som varmekilder.

Frankrig

Det franske program er muligvis det mest omfattende i Europa. Der lægges særlig vægt på research i stedet for at bygge generatorer. Foruden de statsejede laboratorier er også private firmaer så som Alcatel, CSF og Hispano-Suiza engagerede særlig på det termoelektriske område. Der gøres også et stort arbejde på at finde metoder til at separere fissionsprodukter.

England

Det engelske program består hovedsagelig af udvikling af strontium-90 generatorer til brug på landjorden. Man har planlagt at bygge generatorer med effekter op til ca. 100 watt (e). Den første isotopgenerator RIPPLE er blevet prøvekørt med gode erfaringer og produktionen vil senere blive overtaget af industrien.

Tyskland

Flere private firmaer såsom Siemens-Schukert og Demag arbejder på flere isotopgeneratorprogrammer med økonomisk støtte fra den vesttyske stat. Der er bl.a. opnået virkningsgrader på 12% ved brug af GeSi termoelektriske elementer, som holdes på en temperatur på 1000°C. Man har også fundet at isotopgeneratorer med strontium-90 med hensyn til pris og vægt kan konkurrere med reaktorer op til effekter på ca. 3 kW (e).

Rusland

Ved Genevekonferencen i 1964 fremviste Rusland for første gang nogle modeller af deres "SNAP" systemer. De første benyttede cerium som varmekilder; men da det var vanskeligt at holde en konstant effekt, skiftede man senere over til strontium-90. Foruden til brug i rumfarten arbejder man også på isotopgeneratorer til brug i vejstationer.

Reference: J.G. Morse "Isotopic Power In Europe", Nuclear News, Maj 1966. Vol. 9. No. 5.

Tabel VI a

COUNTRY	UNITED KINGDOM				FRANCE		GERMANY	
DESIGNATION	RIPPLE I (a)	RIPPLE II	RIPPLE III & IV	RIPPLE V	NONE	NONE	NONE	NONE
USE	Experimental prototype (Terrestrial)	Experimental Prototype (Terrestrial)	Experimental	Marine Navigation Light	Demonstration Device (Space)	Prototype (Space)	Satellite	Satellite
ISOTOPE	Sr 90	Sr 90	Sr 90	Sr 90	Po 210	Sr 90	Sr 90	Sr 90
INITIAL POWER (W _{el}) Gen	75mW	78mW	750mW	1.4	0.3	12.5	10	500-3000
SIZE (cm) H =	41 64	22 23	—	—	6.6 8.5	—	—	—
TOTAL WEIGHT (kg)	400	230	275	—	0.300	8.0(Gen. + Conv.) without fuel capsule + shield	0.5 kg/watt	100 kg/kW
DESIGN LIFE (years)	10	10	—	5	—	5	—	1
CURRENT STATUS	Operation early 1965	Operation early 1965	Under Construct.	Under Construct.	Generator 6/65 Fueling 6/66	Initiated Jan. 1966 Gen. Test 68	In design	Design study and Test
MANUFACTURER	UKAEA AERE Harwell	UKAEA AERE Harwell	UKAEA AERE Harwell	UKAEA AERE Harwell	C.E.A. and C.S.F.	C.N.E.S. C.S.F. S.N.E.C.M.A.	BOLKOW	JUNKERS
TYPE OF DIRECT CONVERSION DEVICES	Thermoelectric Bi ₂ Te ₃ (18 couples)	Thermoelectric Bi ₂ Te ₃ (18 couples)	Thermoelectric Bi ₂ Te ₃	Thermoelectric Bi ₂ Te ₃ (double-ended Module)	Thermoelectric Bi ₂ Te ₃	Thermoelectric GeSi 12 couples in series(2.14 volts)	Thermoelectric GeSi	Turboelectric Rankine (Hg)
OVERALL EFFICIENCY (%)	1.77(0.67) incl. converter)	1.77 (0.67) incl. converter)	2.6	—	4.7	4.7	~6	~12
(°C)	Hot	180	—	—	200	900	830	—
	Cold	40	—	—	25	250	270	—
INITIAL THERMAL POWER (W.th)	4.4	4.4	29	—	6.4	265	—	—
QUANTITY OF ISOTOPES	700C nominal	700C nominal	4600	—	200C (44 mg)	—	—	—
TYPICAL FUEL FORM	SrTiO ₃ in S. S. capsule	SrTiO ₃ in S. S. capsule	SrTiO ₃	SrTiO ₃	Electrolytic Po Metal on Pt sheets	SrTiO ₃ Hastelloy—C capsule	SrTiO ₃	SrTiO ₃
SHIELDING REQUIREMENT	15 cm of lead (to meet internat. Standards for pub. exhibit.)	7.5 cm of Tungsten alloy (to meet internat. Standards for pub. exhibit.)	Tungsten alloy	Tungsten alloy	No Shielding other than structural material	—	No Shielding	—
DC. DC CONVERTERS	0.4V—195mA (78 mW) 6V—5mA (30 mW)	0.4V-195mA (78 mW) 6V-5mA (30 mW)	—	—	No 1V—0.3A	80% effc. 2.1—12V at 10 watts	—	—

(a) — RIPPLE — Radioactive Isotope Powered Pulsed Light Equipment

Tabel VI b

COUNTRY	EURATOM				U S S R			NETHERLANDS
DESIGNATION	EURIG 2	HPTC—1	BETA I	BETA II	PROTOTYPE V	PROTOTYPE VI	PROTOTYPE VII	NONE
USE	Experimental Prototype (Terrestrial)	Lab. Prototype (Space)	Automatic Weather Station	Automatic Weather Station	Demonstration Device (Space)	Demonstration Device (Space)	Demonstration Device (Space)	Prototype (Terrestrial)
ISOTOPE	Tm ¹⁷⁰	—	Ce ¹⁴⁴	Sr ⁹⁰	Po ²¹⁰	Po ²¹⁰	Po ²¹⁰	Sr ⁹⁰
INITIAL POWER (W _{el}) Gen	5	~10	5.6	5 to 7	10.15	10.9	5.8	1000
SIZE (cm) H =	10.0 11.5	—	—	35.0 40.0	19.5 12.8	19.6 12.6	19.0 21.0	—
TOTAL WEIGHT (kg)	90 (87.5 shielding)	—	400	500 total	3.1 (Without isotope capsule)	2.7 (Without isotope capsule)	2.8 (Without isotope capsule)	—
DESIGN LIFE (years)	—	1	—	10	—	—	—	1
CURRENT STATUS	Hardware being assembled	Design Study and Test	Operation 1964	Experimental Operation	Operation 1965	Operation 1965	Operation 1965	Design study and Test
MANUFACTURER	Ispra, Italy	Ispra, Italy	—	—	—	—	—	RCN PHILIPS
TYPE OF DIRECT CONVERSION DEVICES	Thermoelectric PbTe (n) GeTe (P)	Thermionic (Cs Vapor)	Thermoelectric Bi ₂ Te ₃ + Bi ₂ Se ₃ "n" Sb ₂ Te ₃ + Sb ₂ Te ₃ "p"	Thermoelectric —	Thermoelectric (SiGe alloy) (8 pairs)	Thermoelectric (SiGe alloy) (8 pairs)	Thermoelectric (SiGe alloy) (8 pairs)	Stirling Cycle (3000 hrs to date)
OVERALL EFFICIENCY (%)	5	~10	4	3.5	3.18	3.47	2.36	~40
(°C)	Hot	330	1600	300	—	861	840	759
	Cold	100	790	20	—	241	250	230
INITIAL THERMAL POWER (W _{th})	80.5	105 (6W/cm ²)	244	150 to 200	320	320	244	—
QUANTITY OF ISOTOPES	40 000 C	—	17 500C	30 000C	10 000C	10 000C	7 700C	4-500 000C
TYPICAL FUEL FORM	Tm ₂ O ₃	—	Ce molybdate in W and S. S. capsules	—	Po metal in S. S. capsule	Po metal in S. S. capsule	Po metal in S. S. capsule	SrTiO ₃
SHIELDING REQUIREMENT	7cm Pb for 10 mR/h at 1m distance	(W-emitter) (Mo-collector)	1R/h at 1m 2 cm W + 8 2 cm Pb or 12 cm Pb	10mR/h at 1m	—	—	—	—
DC. DC CONVERTERS	—	—	3.5 V	3.5 to 4.5V	No 3.9 V	No 3.6 V	No 1.4 V	—

Anderkendelse

Jeg ønsker at takke dr. J. Marstrand for gennemsyn og værdifuld kritik af rapporten. Teknisk tegner E.K. Nielsen har også ydet værdifuld bistand ved tilrettelæggelse af illustrationer og figurer og frk. R. Hansen, skrivestuen, været behjælpelig med skrivearbejdet.